

LA NUTRITION MINÉRALE DU COTONNIER EN CULTURE SANS SOL

par

M. BRAUD

Chef de la Section d'Agronomie
Station Centrale de Recherches
BAMBARI - Centrafrique

SOMMAIRE

1. MÉTHODE EXPÉRIMENTALE.
2. RECHERCHE DE LA COMPOSITION OPTIMALE DE LA SOLUTION NUTRITIVE POUR LA CULTURE SANS SOL DU COTONNIER.
3. ETUDES PARTICULIÈRES.
4. CONCLUSIONS.

L'étude de la fertilisation minérale du cotonnier telle que nous la conduisons actuellement au champ montre tout l'intérêt que peuvent présenter les analyses foliaires tant pour l'interprétation des résultats que pour l'orientation des programmes. Nous avons conscience d'avoir entre les mains un outil extrêmement précieux. Mais ses conditions d'élaboration à partir des résultats obtenus au champ dans des situations très variables exigent qu'il soit perfectionné. Les niveaux critiques doivent être précisés dans des conditions variées. Toutes les situations ne sont pas forcément représentées naturellement : c'est le cas pour le potassium. L'échantillonnage doit être fait avec précision pour obtenir des résultats valables. Ce sont autant de points qui restent à étudier.

Continuer à le faire au champ, c'était encore se placer sous la dépendance des facteurs du milieu autres que la nutrition minérale avec toutes les interactions possibles. Nous avons décidé de poursuivre cette étude dans des conditions telles que la nutri-

tion minérale soit le seul facteur variable, donc en culture sans sol bien protégée du point de vue phytosanitaire. L'étude est conduite à BAMBARI (R.C.A.).

Cette technique a été suffisamment mise au point dans le monde entier pour qu'il soit inutile de reprendre des travaux sur ce sujet. Néanmoins, les conditions de travail et les moyens dont nous disposons à BAMBARI nous ont conduit à faire une étude préliminaire sur la nutrition minérale du cotonnier dans notre propre cadre de travail. La méthode des coupe a été utilisée, ce qui nous a permis de vérifier avec le cotonnier les principaux résultats et conclusions exposés par L. RICHARD dans « Les études de nutrition minérale chez les végétaux - Contribution à leur méthodologie ».

Nous avons pu montrer parallèlement que des études pouvaient être conduites avec notre méthode expérimentale pour préciser certains points particuliers de la fertilisation minérale.

1. — MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Le procédé utilisé est la culture à niveau constant.

Les vases de végétation sont des bacs cubiques, de 25 cm de côté, construits en chlorure de polyvinyle, peints extérieurement en blanc. Un tuyau en chlorure de polyvinyle souple est fixé sur le fond et sert à la vidange et à l'aération.

Un litre de gros graviers (4 à 10 mm de diamètre) garnit le fond des vases pour faciliter la percolation. Douze litres de sable lavé et calibré entre 1 et 4 mm

de diamètre complètent le substrat. Une excavation de 3 cm de profondeur et de diamètre, située à la partie supérieure du bac, est remplie de sable fin et sert de lit de semence. Les différents matériaux constituant le substrat proviennent de la Ouaka et sont lavés deux fois pendant le calibrage avec de l'eau de rivière. Le milieu de départ n'est donc pas pur.

Le cotonnier utilisé est un *Gossypium hirsutum*, variété D.9 sélectionné à BAMBARI.

Les graines sont délintées à l'acide sulfurique et calibrées. Celles qui sont utilisées pour un essai ont le même poids à ± 5 mg. La germination est déclanchée au laboratoire 36 heures avant la mise en place en mettant les graines à germer sur du sable humide. Un deuxième tri est fait au cours de la transplantation. Trois graines sont semées par bac. Le démarrage à un plant est effectué une semaine plus tard ce qui permet un troisième choix. Le matériel végétal est donc aussi homogène que possible.

Le procédé choisi oblige à une aération quotidienne. Elle est effectuée chaque matin entre 7 h et 10 h pour la vidange complète du bac. Cette opération est mise à profit pour ramener le volume de solution libre à 3 000 ml par addition d'eau déminéralisée.

Les éléments nutritifs sont apportés sous forme de solutions diluées renouvelées selon le rythme suivant :

1^{er} apport : 7 jours après le semis ;

2^e et 3^e apport : à 14 jours d'intervalle ;

puis une fois par semaine à partir du 4^e apport (35^e jour).

À chaque renouvellement, la solution précédente est éliminée.

Les compositions de ces solutions seront données dans l'étude de chaque essai particulier.

Les oligo-éléments sont ajoutés aux macro-éléments en quantité constante à partir des solutions mère suivantes :

Solution mère I : citrate de fer : 5,25 g/l.

Solution mère II :

Acide borique : 2,55 g/l.

Chlorure de manganèse : 1,82 g/l.

Chlorure de zinc : 1,21 g/l.

Chlorure de cuivre : 0,14 g/l.

Un millilitre de chacune de ces solutions est apporté par vase à chaque renouvellement des macro-éléments.

Le pH de chaque solution est amené à 6,0.

Chaque traitement est répété quatre fois, chaque répétition étant représentée par un cotonnier dans un vase de végétation. L'ensemble des vases est disposé sur quatre rangées espacées d'un mètre. Les vases sont placés sur chaque rangée de façon à laisser un intervalle de 0,50 m entre chaque cotonnier. Les rangées sont orientées Est-Ouest et la disposition des vases est telle que chaque traitement se trouve représenté dans une colonne (dispositif carré latin), pour annuler le gradient Levant-Couchant constaté.

Le premier essai a été mis en place dans un abri recouvert de tôles de polyester et fermé par un grillage de Textiglass pour éliminer la pluviosité et le parasitisme. Les tôles se sont obscurcies au bout de deux ans et le développement végétatif a été excessif. Un deuxième essai réalisé dans ces conditions a donné des résultats ininterprétables que nous n'examinerons pas. Dans un troisième essai, les vases ont été disposés à l'extérieur de l'abri. La protection contre la pluie a été assurée par un film de chlorure de polyéthylène placé sur le vase et perforé d'un trou assez large pour le passage de la tige du cotonnier. Le parasitisme est contrôlé par de fréquents traitements insecticides.

II. — RECHERCHE DE LA COMPOSITION OPTIMALE DE LA SOLUTION NUTRITIVE POUR LA CULTURE SANS SOL DU COTONNIER

a) Essai préliminaire

Cet essai a été réalisé de septembre 1962 à février 1963. Son but était de mettre au point notre système de culture sans sol tout en comparant un certain nombre de solutions entre elles, avant de passer à un programme plus complexe.

Les solutions comparées sont les suivantes :

1. Solution de Hoagland.
2. Solution de New Jersey Agr. Exp. St.
3. Solution de Purdue University.
4. Solution de Shell Curaçao.
5. Solution Homès.

Leur composition est la suivante : (par litre)

Solution	1		2		3		4		5	
	mg	mM	mg	mM	mg	mM	mg	mM	mg	mM
(NO ₃) ₂ Ca	820	5,0	736	4,5					845	5,1
NO ₃ K	505	5,0			633	6,3	707	7,0	273	2,7
NO ₃ NH ₄									200	2,5
PO ₄ H ₂ K	136	1,0	312	2,3					285	2,1
(PO ₄ H ₂) ₃ P										
Ca. 1H ₂ O					454	1,8	304	2,0		
SO ₄ Mg. 7H ₂ O	492	2,0	566	2,3	789	3,2	492	2,0	504	2,0
SO ₄ K ₂					295	1,7				
SO ₄ (NH ₄) ₂			95	0,7	211	1,6				
SO ₄ Ca. 2H ₂ O							1 204	7,0		

et traduite en milliéquivalents par litre :

Solution	1	2	3	4	5
	még	még	még	még	még
NO ₃ ⁻	15,0	9,0	6,3	7,0	18,0
SO ₄ ⁻	4,0	6,0	13,0	18,0	4,0
PO ₄ H ₂ ⁻	1,0	2,3	13,6	14,0	2,1
K ⁺	6,0	2,3	9,7	7,0	4,8
Ca ⁺⁺	10,0	9,0	3,6	18,0	10,3
Mg ⁺⁺	4,0	4,6	6,4	4,0	4,0

Les productions de coton-graine ont été :

Solution de Hoagland :	78,0 g par plant
Solution de New-Jersey :	56,2 g par plant
Solution de Purdue :	63,2 g par plant
Solution de Shell :	66,2 g par plant
Solution de Homès :	71,0 g par plant
p.p.d.s. à P = 0,05 :	9,3 g par plant
C.V. :	9,1 %.

La solution de Hoagland donne le meilleur résultat. Elle est équivalente à celle d'Homès mais supérieure à toutes les autres.

Le coefficient de variation de l'essai est de 9,1 %. Notre technique de culture sans sol donne donc des résultats homogènes et nous ne la modifierons pas pour les essais à venir.

Des analyses foliaires ont été effectuées à partir de feuilles prélevées à l'aisselle d'une fleur ouverte le jour du prélèvement et située aux premiers nœuds des première, troisième, cinquième et septième branches fructifères. Toutes les feuilles d'un même traitement et pour une position donnée ont été mélangées pour analyse.

Ces premiers résultats semblent montrer que c'est la feuille prélevée sur la 3^e branche fructifère qui reflète le mieux la nutrition minérale du cotonnier et présente le maximum de sensibilité aux variations du milieu.

Un calcul de régression linéaire montre que les additions d'un még de NO₃⁻, SO₄⁻, PO₄H₂⁻ entraînent respectivement dans les feuilles une augmentation des teneurs de 0,077 % pour l'azote, de 0,036 % pour le soufre et de 0,132 % pour le phosphore.

La solution de Hoagland, qui a donné la meilleure production de graines, a la composition suivante :

15 még de NO ₃ ⁻	
4 még de SO ₄ ⁻	(par litre de solution)
1 még de PO ₄ H ₂ ⁻	

Les teneurs des feuilles des cotonniers sont :

2,59 % de N
0,40 % de S
0,13 % de P

et montrent de nettes déficiences en azote et en phosphore associées à un léger excès de soufre.

L'étude de l'ensemble des résultats d'analyses foliaires effectuées à partir de prélèvements réalisés sur des essais au champ nous a permis de fixer provisoirement les niveaux optimum à 4,0 % pour l'azote et 0,30 % pour le soufre et le phosphore.

En admettant les résultats précédents et en négligeant les interactions entre les différents éléments, ce qui représente une grossière approximation, la composition optimale du milieu devrait être la suivante :

33 még de NO ₃ ⁻
1,2 még de SO ₄ ⁻
2,3 még de PO ₄ H ₂ ⁻

Ce résultat sera retenu pour l'étude des surfaces de réponse des différents macro-éléments.

La même approche ne peut être faite pour les cations K⁺, Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ pour lesquels nous n'avons obtenu aucun résultat à partir d'essais au champ. L'équilibre de la solution de Hoagland sera conservé.

b) Etude des surfaces de réponse

$$\begin{aligned} \text{NO}_3^- \times \text{SO}_4^- \\ \text{NO}_3^- \times \text{PO}_4\text{H}_2^- \\ \text{SO}_4^- \times \text{PO}_4\text{H}_2^- \end{aligned}$$

Le but de ce deuxième essai, réalisé en 1964, était de vérifier sur cotonnier, dans des conditions de nutrition minérale bien contrôlées, les résultats obtenus par L. RICHARD sur *Aspergillus niger*, à savoir que :

- la projection de la ligne de crête pour chaque surface de réponse étudiée est une droite,
- il est possible d'établir une liaison simple entre les trois éléments étudiés de type :

$$\frac{\text{NO}_3^-}{a} = \frac{\text{SO}_4^-}{b} = \frac{\text{PO}_4\text{H}_2^-}{c}$$

Cette vérification est réalisée en pratiquant trois coupes à trois niveaux différents dans chaque surface étudiée.

Dispositif expérimental

La solution de Hoagland est la solution de base pour tous les éléments n'entrant pas dans la variation étudiée. C'est ainsi que le rapport anions/cations est maintenu pour tous les traitements égal à 1,1 et l'équilibre entre les trois cations est le suivant :

$$\frac{\text{K}}{3} = \frac{\text{Ca}}{5} = \frac{\text{Mg}}{2} \quad (\text{en még})$$

Le traitement central a la composition suivante :

NO ₃ ⁻ = 30 még	K ⁺ = 10,9
SO ₄ ⁻ = 2 »	Ca ⁺⁺ = 18,2
PO ₄ H ₂ ⁻ = 2 »	Mg ⁺⁺ = 7,3

Nous avons donc tenu compte du résultat précédant pour avoir des coupes sensiblement orthogonales à la ligne de crête et dont les résultats puissent être ajustés à une courbe du second degré.

Les différents traitements sont rassemblés dans le tableau ci-dessous. Leur composition est donnée en méq pour trois litres de solution, donc pour un vase de végétation.

Surface $\text{NO}_3^- \times \text{SO}_4^{--}$

N°	Relations $\text{NO}_3^- \times \text{SO}_4^{--}$	NO_3^-	SO_4^{--}	PO_4H_2^-
1	$2 \text{NO}_3^- + 15 \text{SO}_4^{--} = 75$	30,0	0,5	2
2		22,5	1	2
3		15,0	1,5	2
4		7,5	2	2
5	$2 \text{NO}_3^- + 15 \text{SO}_4^{--} = 120$	52,5	0,5	2
6		41,2	1,25	2
7		30,0	2	2
8		18,7	2,75	2
9		7,5	3,5	2
10	$2 \text{NO}_3^- + 15 \text{SO}_4^{--} = 165$	75	0,5	2
11		52,5	2	2
12		30	3,5	2
13		7,5	5	2

Surface $\text{NO}_3^- \times \text{PO}_4\text{H}_2^-$

N°	Relations $\text{NO}_3^- \times \text{PO}_4\text{H}_2^-$	NO_3^-	SO_4^{--}	PO_4H_2^-	
14	$\text{NO}_3^- + 15 \text{PO}_4\text{H}_2^- = 37,5$	30,0	2	0,5	N° 4
15		22,5	2	1	
16		15,0	2	1,5	
17		7,5	2	2	
18	$\text{NO}_3^- + 15 \text{PO}_4\text{H}_2^- = 60$	52,5	2	0,5	N° 8
19		41,2	2	1,25	
20		30	2	2	
21		18,7	2	2,75	
22		7,5	2	3,5	
23	$\text{NO}_3^- + 15 \text{PO}_4\text{H}_2^- = 82,5$	75	2	0,5	N° 11
24		52,5	2	2	
25		30	2	3,5	
26		7,5	2	5	

Surface $\text{PO}_4\text{H}_2^- \times \text{SO}_4^{--}$

N°	Relations $\text{PO}_4\text{H}_2^- \times \text{SO}_4^{--}$	NO_3^-	SO_4^{--}	PO_4H_2^-	
27	$2 \text{PO}_4\text{H}_2^- + \text{SO}_4^{--} = 5$	30	0,5	2	N° 1
28		30	1	1,5	
29		30	1,5	1	
30		30	2	0,5	
31	$2 \text{PO}_4\text{H}_2^- + \text{SO}_4^{--} = 8$	30	0,5	3,5	N° 8
32		30	1,25	2,75	
33		30	2	2	
34		30	2,75	1,25	
35		30	3,5	0,5	
36	$2 \text{PO}_4\text{H}_2^- + \text{SO}_4^{--} = 11$	30	0,5	5	N° 25
37		30	2	3,5	
38		30	3,5	2	
39		30	5	0,5	

Résultats et interprétation

Tous les résultats sont ajustés à une courbe de second degré selon la méthode décrite par L. RICHARD dans « Les études de nutrition minérale chez les végétaux. Contribution à leur méthodologie ». Nous renvoyons donc à cet ouvrage pour le détail des calculs et nous ne donnerons que les équations de régression avec les maximums observés.

Surface $\text{NO}_3^- \times \text{SO}_4^{--}$ (graph. 1)

1^{re} coupe :

$$2 \text{ NO}_3^- + 15 \text{ SO}_4^{--} = 75 \text{ avec } 7,5 \leq \text{NO}_3^- \leq 30 \text{ méq}$$

$$Y = 34,0 + 36,6 X - 12 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
1	0	33,2	34,0
2	1	60,5	58,5
3	2	56,9	58,8
4	3	35,9	34,9

$$M_1 \quad \begin{cases} \text{NO}_3^- = 18,7 \text{ méq} \\ \text{SO}_4^{--} = 1,25 \text{ méq} \end{cases}$$

NO_3^- variant de 18,4 à 18,8 méq

2^e coupe :

$$2 \text{ NO}_3^- + 15 \text{ SO}_4^{--} = 120 \text{ avec } 7,5 \leq \text{NO}_3^- \leq 52,5 \text{ méq}$$

$$Y = 36,2 + 64,0 X - 16,2 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
5	0	33,8	36,2
6	1	88,1	84,0
7	2	102,6	99,4
8	3	73,9	82,4
9	4	36,7	33,0

$$M_2 \quad \begin{cases} \text{NO}_3^- = 30,2 \text{ méq} \\ \text{SO}_4^{--} = 2,0 \text{ méq} \end{cases}$$

NO_3^- variant de 30,1 à 30,4 méq

3^e coupe :

$$2 \text{ NO}_3^- + 15 \text{ SO}_4^{--} = 165 \text{ avec } 7,5 \leq \text{NO}_3^- \leq 75 \text{ méq}$$

$$Y = 44,6 + 104,8 X - 36,1 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
10	0	40,5	44,6
11	1	125,1	113,3
12	2	97,8	109,8
13	3	38,2	34,1

$$M_3 \quad \begin{cases} \text{NO}_3^- = 42,4 \text{ méq} \\ \text{SO}_4^{--} = 2,67 \text{ méq} \end{cases}$$

NO_3^- variant de 41,9 à 42,8 méq

Equation de la projection de la ligne de crête :

$$\text{NO}_3^- - 17,0 \text{ SO}_4^{--} + 3,10 = 0$$

Surface $\text{NO}_3^- \times \text{PO}_4\text{H}_2^-$ (graph. 2)

1^{re} coupe :

$$\text{NO}_3^- + 15 \text{ PO}_4\text{H}_2^- = 37,5 \text{ avec } 7,5 \leq \text{NO}_3^- \leq 30 \text{ méq}$$

$$Y = 60,7 + 20,9 X - 9,9 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
14	0	59,1	60,7
15	1	76,5	71,7
16	2	58,1	62,9
17	3	35,9	34,3

$$M_1 \quad \begin{cases} \text{NO}_3^- = 22,0 \text{ méq} \\ \text{PO}_4\text{H}_2^- = 1,03 \text{ méq} \end{cases}$$

NO_3^- variant de 21,7 à 22,8 méq

2^e coupe :

$$\text{NO}_3^- + 15 \text{ PO}_4\text{H}_2^- = 60 \text{ avec } 7,5 \leq \text{NO}_3^- \leq 52,5 \text{ méq}$$

$$Y = 68,2 + 40,5 X - 11,5 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
18	0	61,1	68,2
19	1	111,5	97,2
20	2	102,6	103,2
21	3	72,8	86,2
22	4	53,2	46,2

$$M_2 \quad \begin{cases} \text{NO}_3^- = 32,7 \text{ méq} \\ \text{PO}_4\text{H}_2^- = 1,82 \text{ méq} \end{cases}$$

NO_3^- variant de 31,8 à 34,6 méq

3^e coupe :

$$\text{NO}_3^- + 15 \text{ PO}_4\text{H}_2^- = 82,5 \text{ avec } 7,5 \leq \text{NO}_3^- \leq 75 \text{ méq}$$

$$Y = 63,6 + 85,5 X - 31,7 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
23	0	61,0	63,6
24	1	125,1	117,4
25	2	100,0	107,8
26	3	37,3	34,8

$$M_3 \quad \begin{cases} \text{NO}_3^- = 44,6 \text{ méq} \\ \text{PO}_4\text{H}_2^- = 2,52 \text{ méq} \end{cases}$$

NO_3^- variant de 43,9 à 45,5 méq

Equation de la projection de la ligne de crête :

$$\text{NO}_3^- - 15,1 \text{ PO}_4\text{H}_2^- - 6,1 = 0$$

Surface $\text{PO}_4\text{H}_2^- \times \text{SO}_4^{--}$ (graph. 3)

1^{re} coupe :

$$2 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + \text{SO}_4^{--} = 5 \text{ avec } 0,5 \leq \text{PO}_4\text{H}_2^- \leq 2 \text{ méq}$$

$$Y = 31,9 + 48,5 X - 13,0 X^2$$

N ^{os} traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
27	0	33,2	31,9
28	1	63,6	67,4
29	2	80,8	76,9
30	3	59,1	60,4

$$M_1 \quad \begin{cases} \text{PO}_4\text{H}_2^- = 1,07 \text{ méq} \\ \text{SO}_4^{--} = 1,43 \text{ méq} \end{cases}$$

PO_4H_2^- variant de 1,0 à 1,10 méq

2^e coupe :

$$2 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + \text{SO}_4^{--} = 8 \text{ avec } 0,5 \leq \text{PO}_4\text{H}_2^- \leq 3,5 \text{ méq}$$

$$Y = 39,0 + 53,2 X - 12,0 X^2$$

N ^{os} traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
31	0	38,4	39,0
32	1	79,7	80,2
33	2	102,6	97,4
34	3	84,0	90,6
35	4	62,3	59,8

$$M_2 \quad \begin{cases} \text{PO}_4\text{H}_2^- = 1,83 \text{ méq} \\ \text{SO}_4^{--} = 2,17 \text{ méq} \end{cases}$$

PO_4H_2^- variant de 1,80 à 1,86 méq

3^e coupe :

$$2 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + \text{SO}_4^{--} = 11 \text{ avec } 0,5 \leq \text{PO}_4\text{H}_2^- \leq 5 \text{ méq}$$

$$Y = 35,7 + 87,2 X - 27,1 X^2$$

N ^{os} traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
36	0	34,4	35,7
37	1	100,0	95,8
38	2	97,8	101,7
39	3	54,7	53,4

$$M_3 \quad \begin{cases} \text{PO}_4\text{H}_2^- = 2,59 \text{ méq} \\ \text{SO}_4^{--} = 2,91 \text{ méq} \end{cases}$$

PO_4H_2^- variant de 2,57 à 2,60 méq

Equation de la projection de la ligne de crête :

$$\text{PO}_4\text{H}_2^- - 1,02 \text{ SO}_4^{--} + 0,38 = 0 \text{ (graph. 4)}$$

Discussion

Ce deuxième essai confirme la précision de la méthode utilisée. L'écart moyen pour la détermination de la concentration optimum en NO_3^- est de 3,2 %. La précision est du même ordre pour les deux autres éléments.

Nous constatons que la ligne de crête de chaque surface se projette selon une droite. Cette droite passe à proximité de l'origine, montrant ainsi que l'apport du substrat simplement lavé à l'eau de rivière est négligeable par rapport aux solutions nutritives.

L'effet dose est net. Les rendements maximum calculés pour chaque coupe et chaque surface le montrent bien :

Dose	$\text{NO}_3^- \times \text{SO}_4^{--}$	$\text{NO}_3^- \times \text{PO}_4\text{H}_2^-$	$\text{PO}_4\text{H}_2^- \times \text{SO}_4^{--}$
1 ^{re} coupe	61,7	71,8	77,1
2 ^e coupe	99,4	103,8	97,9
3 ^e coupe	120,7	121,3	105,8

En négligeant les termes constants, nous avons les relations suivantes :

$$\frac{\text{NO}_3^-}{17} = \frac{\text{SO}_4^{--}}{1}$$

$$\frac{\text{NO}_3^-}{15} = \frac{\text{PO}_4\text{H}_2^-}{1}$$

$$\frac{\text{PO}_4\text{H}_2^-}{1} = \frac{\text{SO}_4^{--}}{1}$$

qui peuvent s'écrire :

$$\frac{\text{NO}_3^-}{16} = \frac{\text{SO}_4^{--}}{1} = \frac{\text{PO}_4\text{H}_2^-}{1}$$

relation du même type que celle définie par L. RICHARD entre Zn, Mg et K sur *Aspergillus niger*.

Les trois droites définies précédemment peuvent être considérées comme les projections d'une seule droite de l'espace.

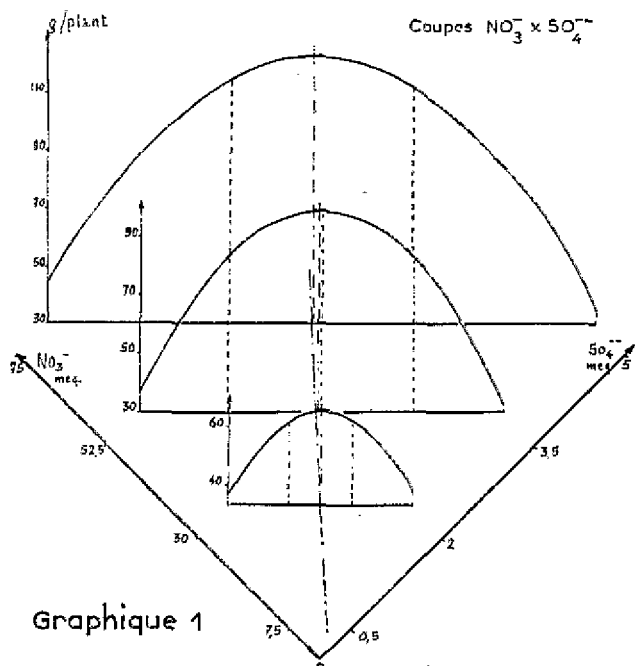
La composition ainsi définie ne différera pratiquement de celle de la solution de Hoagland que par la teneur en soufre.

c) Etude des surfaces de réponse intéressant les éléments N, P, K, Ca et Mg

Nous avons établi une relation simple entre les éléments N, S et P. Pour définir la solution de façon aussi complète que possible, nous avons repris cette expérimentation en l'étendant aux autres éléments.

ESSAI BRI 64

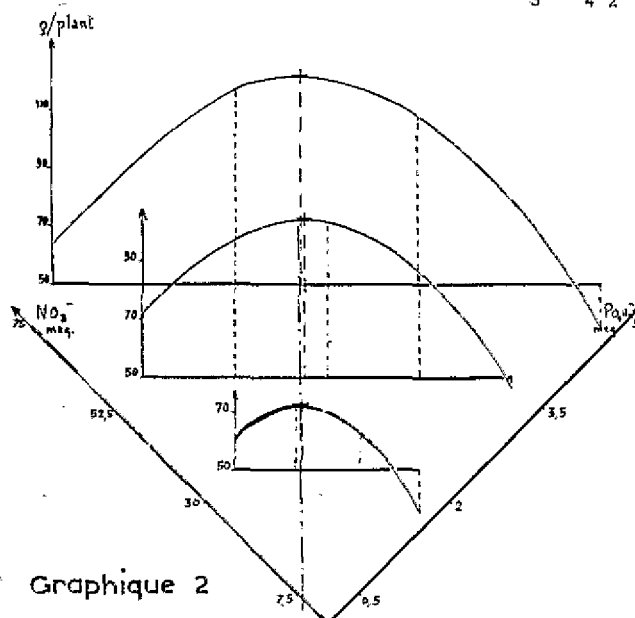
Coupes $\text{NO}_3^- \times \text{SO}_4^{--}$



Graphique 1

ESSA BRI 64

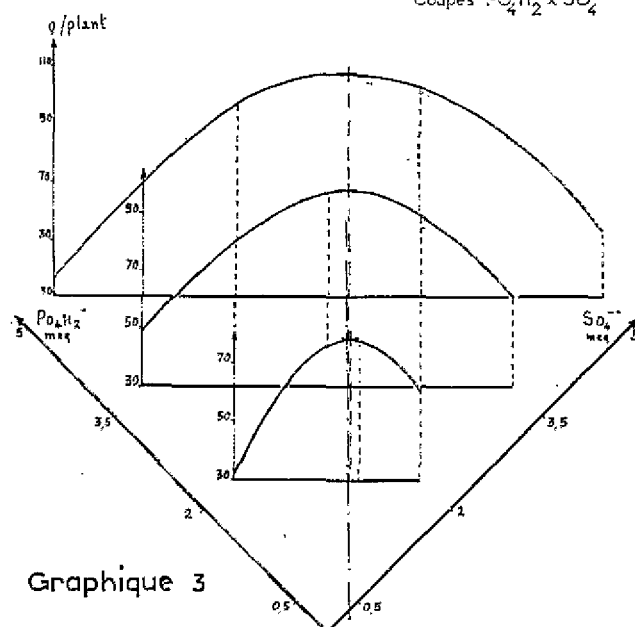
Coupes $\text{NO}_3^- \times \text{PO}_4\text{H}_2^-$



Graphique 2

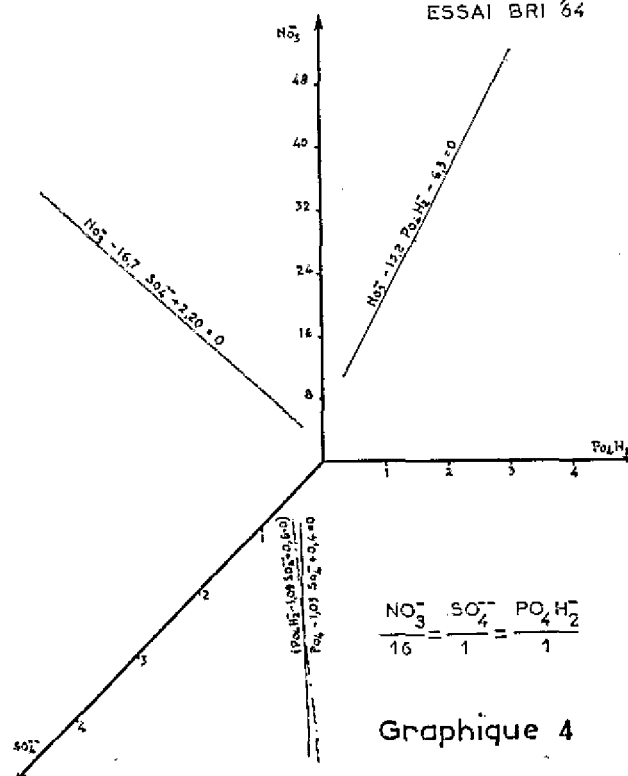
ESSAI BRI 64

Coupes $\text{PO}_4\text{H}_2^- \times \text{SO}_4^{--}$



Graphique 3

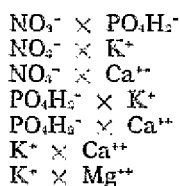
ESSAI BRI 64



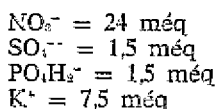
Graphique 4

Dispositif expérimental

Sept surfaces ont été étudiées à deux niveaux différents :



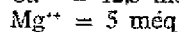
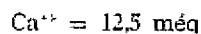
Au niveau 1, le traitement central a la composition suivante :



N°	Relations $\text{NO}_3^- \times \text{PO}_4\text{H}_2^-$	NO_3^-	PO_4H_2^-
1	$\text{NO}_3^- + 8 \text{ PO}_4\text{H}_2^- = 36$	32	0,5
2		28	1,0
3		24	1,5
4		20	2,0
5		16	2,5
6	$\text{NO}_3^- + 8 \text{ PO}_4\text{H}_2^- = 72$	64	1
7		56	2
8		48	3
9		40	4
10		32	5

	Relations $\text{NO}_3^- \times \text{K}^+$	NO_3^-	K^+
11	$\text{NO}_3^- + 1,6 \text{ K}^+ = 36$	32	2,5
12		28	5
13		24	7,5
14		20	10,0
15		16	12,5
16	$\text{NO}_3^- + 1,6 \text{ K}^+ = 72$	64	5
17		56	10
18		48	15
19		40	20
20		32	25

N°	Relations $\text{NO}_3^- \times \text{Ca}^{++}$	NO_3^-	Ca^{++}
21	$\text{NO}_3^- + 0,8 \text{ Ca}^{++} = 34$	32	2,5
22		28	7,5
23		24	12,5
24		20	17,5
25		16	22,5
26	$\text{NO}_3^- + 0,8 \text{ Ca}^{++} = 68$	64	5
27		56	15
28		48	25
29		40	35
30		32	45



Les éléments anioniques satisfont à la relation définie dans l'essai précédent. Les cations sont dans le même rapport que dans la solution de Hoagland.

Pour chaque coupe, les teneurs des éléments étudiés sont seuls variables, les autres éléments ayant une valeur constante et égale à celle du traitement central.

Au niveau 2, les teneurs précédentes sont doublées.

Chaque coupe est étudiée au moyen de 5 traitements.

Ces différents traitements sont rassemblés ci-dessous. Leur composition est donnée en méq pour trois litres de solution. Les concentrations ne sont indiquées que pour les éléments étudiés.

	Relations $\text{PO}_4\text{H}_2^- \times \text{K}^+$	PO_4H_2^-	K^+
31	$3 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + \text{K}^+ = 15$	0,5	12,5
32		1,0	10,0
33		1,5	7,5
34		2,0	5,0
35		2,5	2,5
36	$5 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + \text{K}^+ = 30$	1	25
37		2	20
38		3	15
39		4	10
40		5	5

N°	Relations $\text{PO}_4\text{H}_2^- \times \text{Ca}^{++}$	PO_4H_2^-	Ca^{++}
41	$10 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + \text{Ca}^{++} = 27,5$	0,5	22,5
42		1	17,5
43		1,5	12,5
44		2	7,5
45		2,5	2,5
46	$10 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + \text{Ca}^{++} = 55$	1	45
47		2	35
48		3	25
49		4	15
50		5	5

	Relation $\text{K}^+ \times \text{Ca}^{++}$	K^+	Ca^{++}
51	$2 \text{ K}^+ + \text{Ca}^{++} = 27,5$	12,5	2,5
52		10	7,5
53		7,5	12,5
54		5	17,5
55		2,5	22,5
56	$2 \text{ K}^+ + \text{Ca}^{++} = 55$	25	5
57		20	15
58		15	25
59		10	35
60		5	45

	Relations $K^+ \times Mg^{++}$	K^+	Mg^{++}
61	$4 K^+ + 5 Mg^{++} = 55$	12,5	1
62		10	3
63		7,5	5
64		5	7
65		2,5	9
66	$4 K^+ + 5 Mg^{++} = 110$	25	2
67		20	6
68		15	10
69		10	14
70		5	18

Résultats et interprétations

La méthode d'interprétation est identique à celle utilisée pour l'essai précédent.

Surface $NO_3^- \times PO_4H_2^-$ (graph. 5)

1^{re} coupe :

$$NO_3^- + 8 PO_4H_2^- = 36 \text{ avec } 16 \leq NO_3^- \leq 32 \text{ méq}$$

$$Y = 63,5 + 32,9 X - 7,3 X^2$$

N ^{os} traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
1	0	59,2	63,5
2	1	98,4	89,1
3	2	95,5	100,1
4	3	93,3	96,5
5	4	81,3	78,3

$$M_1 \begin{cases} NO_3^- = 23,0 \text{ méq} \\ PO_4H_2^- = 1,62 \text{ méq} \end{cases}$$

NO_3^- variant de 22,6 à 23,2 méq

2^e coupe :

$$NO_3^- + 8 PO_4H_2^- = 72 \text{ avec } 32 \leq NO_3^- \leq 64 \text{ méq}$$

$$Y = 107,2 + 47,1 X - 11,0 X^2$$

N ^{os} traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
6	0	100,6	107,2
7	1	155,1	143,3
8	2	161,5	157,4
9	3	132,3	149,5
10	4	127,3	119,6

$$M_2 \begin{cases} NO_3^- = 46,9 \text{ méq} \\ PO_4H_2^- = 3,14 \text{ méq} \end{cases}$$

NO_3^- variant de 46,6 à 47,0 méq

Equation de la projection de la ligne de crête :

$$NO_3^- - 15,7 PO_4H_2^- + 2,6 = 0$$

Surface $NO_3^- \times K^+$ (graph. 6)

1^{re} coupe :

$$NO_3^- + 1,6 K^+ = 36 \text{ avec } 16 \leq NO_3^- \leq 32 \text{ méq}$$

$$Y = 73,2 + 24,0 X - 6,2 X^2$$

N ^{os} traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
11	0	70,1	73,2
12	1	97,2	91,0
13	2	95,5	96,4
14	3	84,4	89,4
15	4	72,9	70,0

$$M_1 \begin{cases} NO_3^- = 24,2 \text{ méq} \\ K^+ = 7,35 \text{ méq} \end{cases}$$

NO_3^- variant de 24,1 à 24,6 méq

2^e coupe :

$$NO_3^- + 1,6 K^+ = 72 \text{ avec } 32 \leq NO_3^- \leq 64 \text{ méq}$$

$$Y = 121,9 + 34,4 X - 8,8 X^2$$

N ^{os} traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
16	0	121,6	121,9
17	1	145,6	147,5
18	2	161,5	155,5
19	3	139,7	145,9
20	4	121,2	118,7

$$M_2 \begin{cases} NO_3^- = 48,4 \text{ méq} \\ K^+ = 14,7 \text{ méq} \end{cases}$$

NO_3^- variant de 48,0 à 49,0 méq

Equation de la projection de la ligne de crête :

$$NO_3^- - 3,26 K^+ - 0,28 = 0$$

Surface $NO_3^- \times Ca^{++}$ (graph. 7)

1^{re} coupe :

$$NO_3^- + 0,8 Ca^{++} = 34 \text{ avec } 16 \leq NO_3^- \leq 32 \text{ méq}$$

$$Y = 74,0 + 30,2 X - 7,8 X^2$$

N ^{os} traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
21	0	70,5	74,0
22	1	106,1	96,4
23	2	95,5	103,2
24	3	95,0	94,4
25	4	70,9	70,0

$$M_1 \begin{cases} NO_3^- = 24,2 \text{ méq} \\ Ca^{++} = 12,2 \text{ méq} \end{cases}$$

NO_3^- variant de 24,1 à 24,5 méq

2^e coupe :

$$\text{NO}_3^- + 0,8 \text{ Ca}^{++} = 68 \text{ avec } 32 \leq \text{NO}_3^- \leq 64 \text{ méq}$$

$$Y = 85,7 + 73,8 X - 17,4 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
26	0	81,0	83,7
27	1	152,3	142,1
28	2	161,5	163,7
29	3	142,9	150,5
30	4	106,3	102,5

$$M_2 \left| \begin{array}{l} \text{NO}_3^- = 47,0 \text{ méq} \\ \text{Ca}^{++} = 26,2 \text{ méq} \end{array} \right.$$

NO₃⁻ variant de 46,9 à 47,1 méq

Equation de la projection de la ligne de crête :

$$\text{NO}_3^- - 1,63 \text{ Ca}^{++} - 4,33 = 0$$

Surface de réponse PO₄H₂⁻ × K⁺ (graph. 8)1^{re} coupe :

$$5 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + \text{K}^+ = 15 \text{ avec } 0,5 \leq \text{PO}_4\text{H}_2^- \leq 2,5$$

$$Y = 58,4 + 34,4 X - 8,3 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
31	0	56,2	58,4
32	1	87,9	84,5
33	2	95,5	94,0
34	3	81,2	86,9
35	4	66,0	63,2

$$M_1 \left| \begin{array}{l} \text{PO}_4\text{H}_2^- = 1,53 \text{ méq} \\ \text{K}^+ = 7,33 \text{ méq} \end{array} \right.$$

PO₄H₂⁻ variant de 1,53 à 1,54 méq2^e coupe :

$$5 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + \text{K}^+ = 30 \text{ avec } 1 \leq \text{PO}_4\text{H}_2^- \leq 5$$

$$Y = 99,1 + 63,5 X - 16,0 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs Moyennes observées	Valeurs ajustées
36	0	99,3	99,1
37	1	146,2	146,6
38	2	161,5	162,1
39	3	146,7	145,6
40	4	96,6	97,1

$$M_2 \left| \begin{array}{l} \text{PO}_4\text{H}_2^- = 2,98 \text{ méq} \\ \text{K}^+ = 14,9 \text{ méq} \end{array} \right.$$

PO₄H₂⁻ variant de 2,94 à 3,01 méq

Equation de la projection de la ligne de crête :

$$\text{K}^+ - 5,22 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + 0,66 = 0$$

Surface de réponse PO₄H₂⁻ × Ca⁺⁺ (graph. 9)1^{re} coupe :

$$10 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + \text{Ca}^{++} = 27,5 \text{ avec } 0,5 \leq \text{PO}_4\text{H}_2^- \leq 2,5 \text{ méq}$$

$$Y = 55,2 + 36,4 X - 8,5 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
41	0	55,0	55,2
42	1	81,4	83,1
43	2	95,5	94,0
44	3	90,5	87,9
45	4	62,3	64,8

$$M_1 \left| \begin{array}{l} \text{PO}_4\text{H}_2^- = 1,57 \text{ méq} \\ \text{Ca}^{++} = 11,8 \text{ méq} \end{array} \right.$$

PO₄H₂⁻ variant de 1,56 à 1,58 méq2^e coupe :

$$10 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + \text{Ca}^{++} = 55 \text{ avec } 1 \leq \text{PO}_4\text{H}_2^- \leq 5 \text{ méq}$$

$$Y = 90,3 + 68,1 X - 18,3 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
46	0	92,1	90,3
47	1	133,4	140,1
48	2	161,5	153,3
49	3	125,5	129,9
50	4	70,9	69,9

$$M_2 \left| \begin{array}{l} \text{PO}_4\text{H}_2^- = 2,86 \text{ méq} \\ \text{Ca}^{++} = 25,4 \text{ méq} \end{array} \right.$$

PO₄H₂⁻ variant de 2,79 à 2,91 méq

Equation de la projection de la ligne de crête :

$$\text{Ca}^{++} - 11,31 \text{ PO}_4\text{H}_2^- + 5,95 = 0$$

Surface de réponse K⁺ × Ca⁺⁺ (graph. 10)1^{re} coupe :

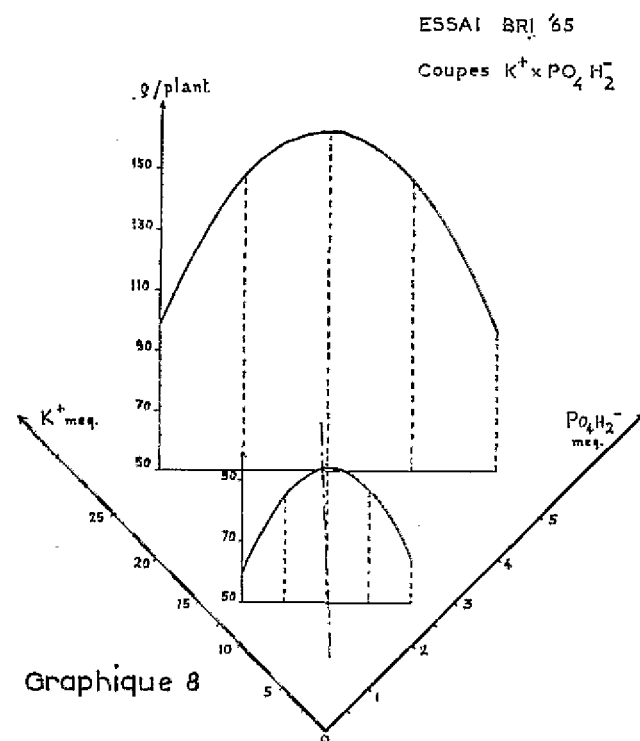
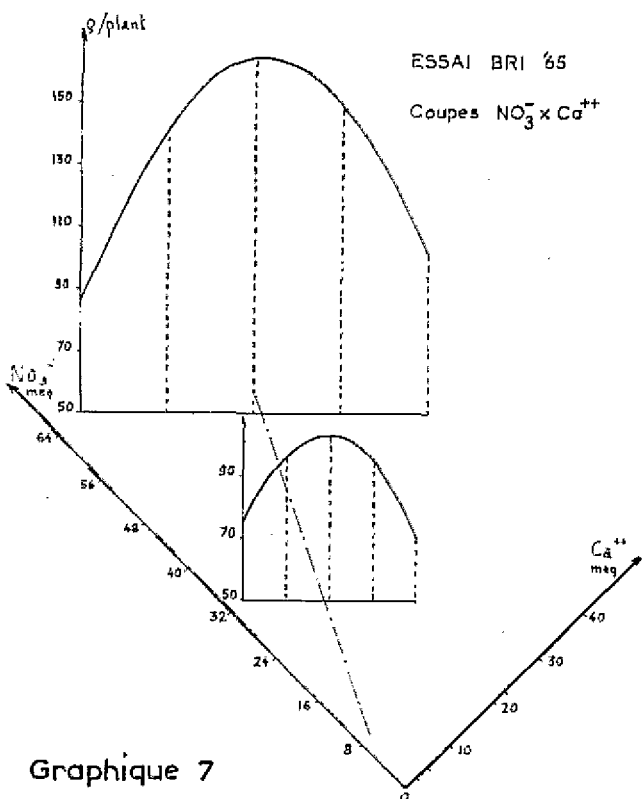
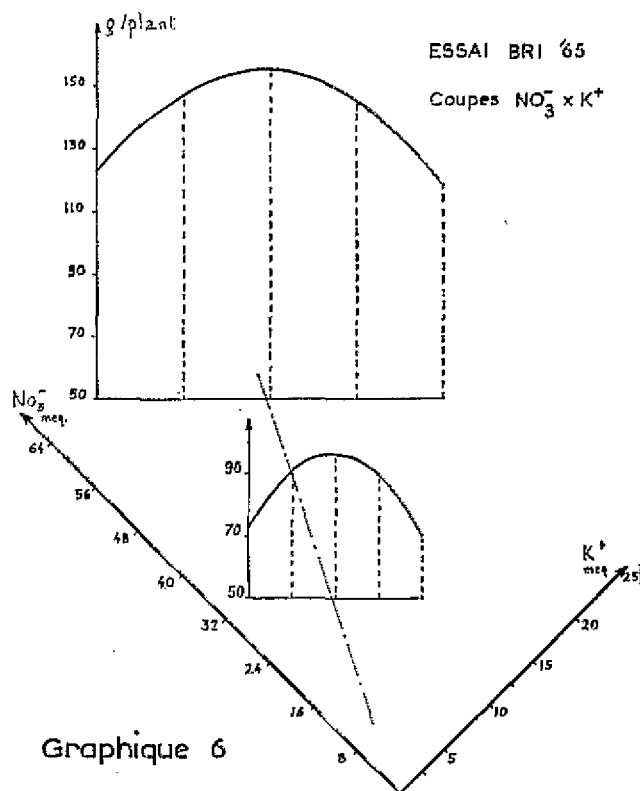
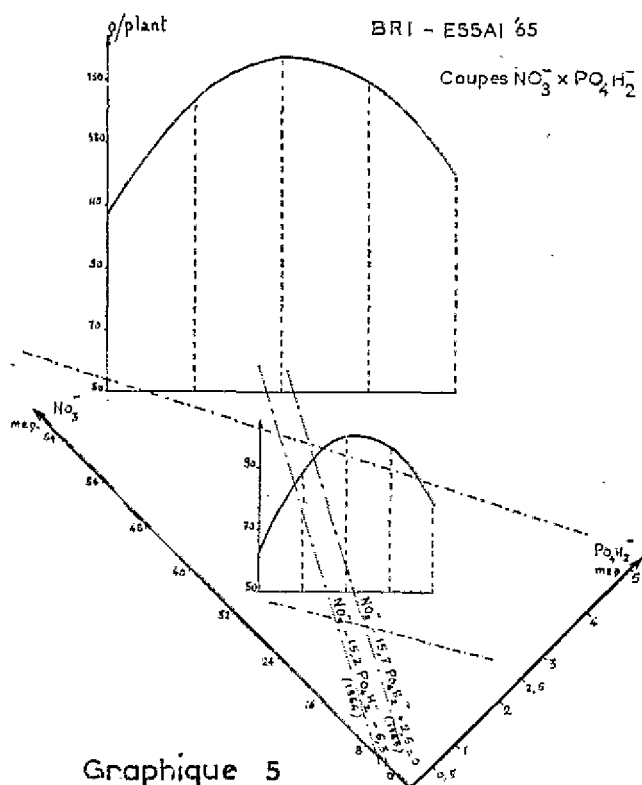
$$2 \text{ K}^+ + \text{Ca}^{++} = 27,5 \text{ avec } 2,5 \leq \text{K}^+ \leq 12,5 \text{ méq}$$

$$Y = 69,5 + 39,3 X - 11,5 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
51	0	78,5	69,5
52	1	91,9	97,3
53	2	95,5	102,1
54	3	76,1	83,9
55	4	53,5	42,7

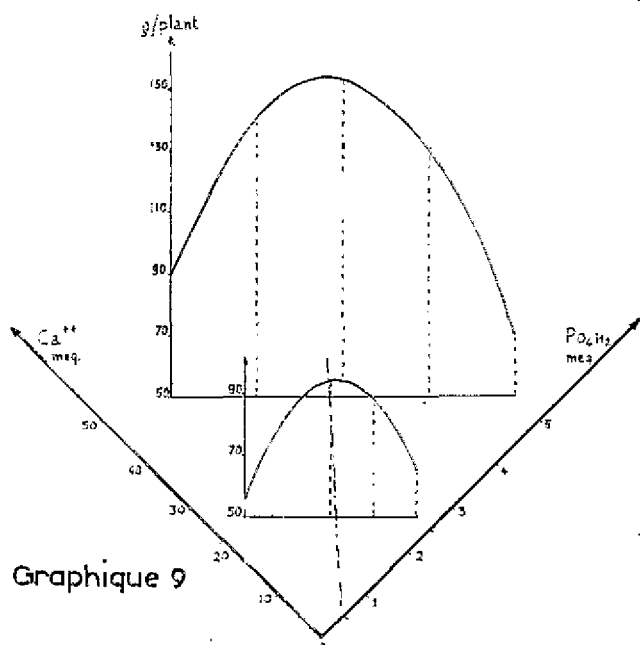
$$M_1 \left| \begin{array}{l} \text{K}^+ = 8,2 \text{ méq} \\ \text{Ca}^{++} = 11,1 \text{ méq} \end{array} \right.$$

K⁺ variant de 8,0 à 8,4 méq



ESSAI BRI 85

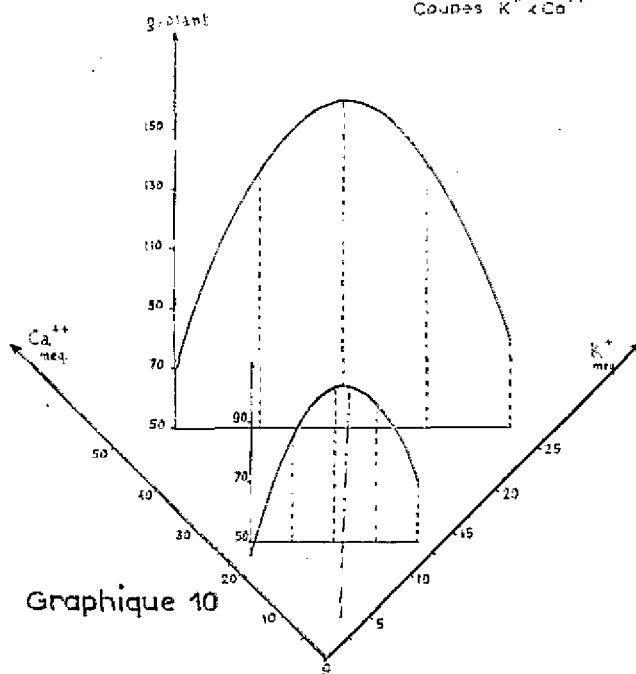
Coupes $Ca^{++} \times PO_4 H_2^-$



Graphique 9

ESSAI BRI 85

Coupes $K^+ \times Ca^{++}$

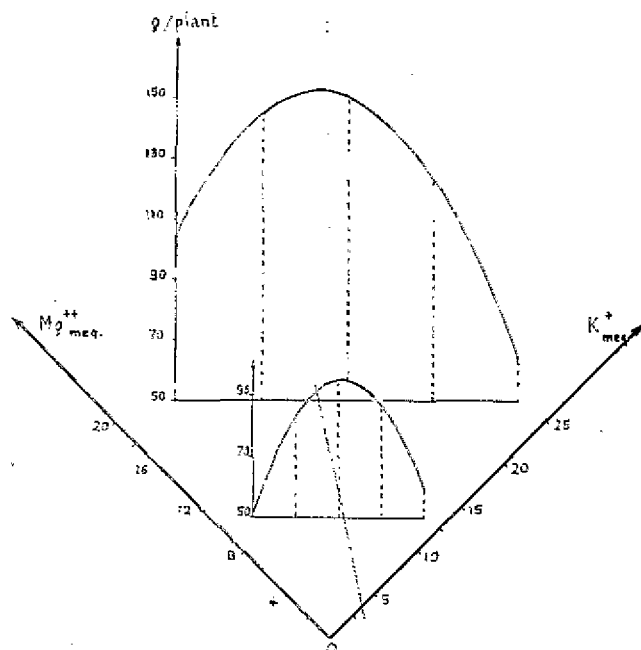


Graphique 10

GRAPHIQUE 11

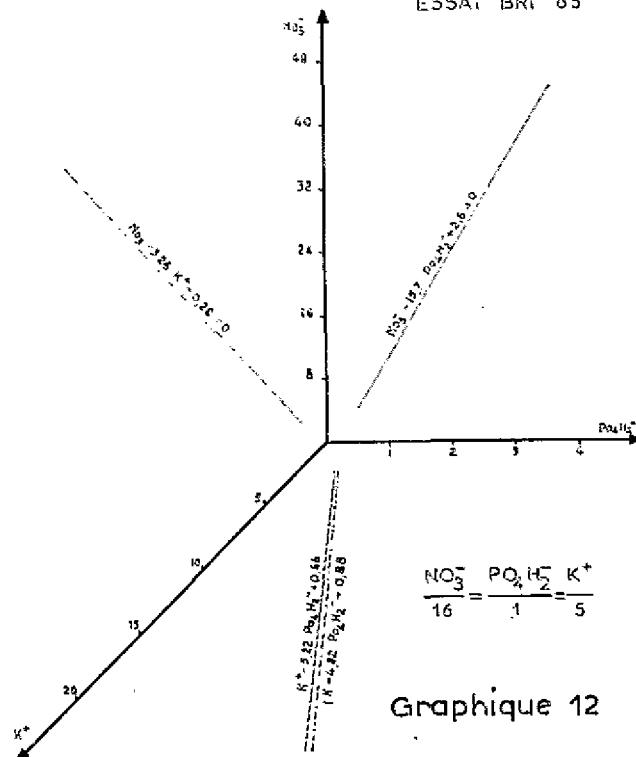
ESSAI BRI 85

Coupes $K^+ \times Mg^{++}$



Graphique 11

ESSAI BRI 85



Graphique 12

2^e coupe :

$$2 K^+ + Ca^{++} = 55 \quad 5 \leq K^+ \leq 25 \text{ méq}$$

$$Y = 77,7 + 83,5 X - 21,4 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
56	0	78,0	77,7
57	1	137,7	139,3
58	2	161,5	159,1
59	3	134,4	135,6
60	4	70,0	69,3

$$M_2 \quad \left| \begin{array}{l} K^+ = 15,25 \text{ méq} \\ Ca^{++} = 24,5 \text{ méq} \end{array} \right.$$

K^+ variant de 15,15 à 15,30 méq

Equation de la projection de la ligne de crête :

$$Ca^{++} - 1,90 K^+ + 4,47 = 0$$

Surface de réponse $K^+ \times Mg^{++}$ (graph. 11)

1^{re} coupe :

$$4 K^+ + 5 Mg^{++} = 55 \text{ avec } 2,5 \leq K^+ \leq 12,5 \text{ méq}$$

$$Y = 58,3 + 37,4 X - 9,8 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
61	0	60,2	58,3
62	1	81,5	85,9
63	2	95,5	93,9
64	3	84,6	82,3
65	4	49,7	51,1

$$M_1 \quad \left| \begin{array}{l} K^+ = 7,73 \text{ méq} \\ Mg^{++} = 4,82 \text{ méq} \end{array} \right.$$

K^+ variant de 7,65 à 7,85

2^e coupe :

$$4 K^+ + 5 Mg^{++} = 110 \text{ avec } 5 \leq K^+ \leq 25 \text{ méq}$$

$$Y = 63,3 + 77,2 X - 16,6 X^2$$

N°s traitements	X	Valeurs moyennes observées	Valeurs ajustées
66	0	68,0	63,3
67	1	111,2	123,9
68	2	161,5	151,3
69	3	144,8	145,5
70	4	105,1	106,5

$$M_2 \quad \left| \begin{array}{l} K^+ = 13,3 \text{ méq} \\ Mg^{++} = 11,3 \text{ méq} \end{array} \right.$$

K^+ variant de 12,5 à 13,7 méq

Equation de la projection de la ligne de crête :

$$K^+ - 0,86 Mg^{++} - 3,61 = 0$$

Discussion

Nous avons donc les relations :

- (1) $NO_3^- - 15,7 PO_4H_2^- + 2,6 = 0$
- (2) $NO_3^- - 3,26 K^+ - 0,28 = 0$
- (3) $NO_3^- - 1,63 Ca^{++} - 4,33 = 0$
- (4) $K^+ - 5,22 PO_4H_2^- + 0,66 = 0$
- (5) $Ca^{++} - 11,31 PO_4H_2^- + 5,95 = 0$
- (6) $Ca^{++} - 1,90 K^+ + 4,47 = 0$
- (7) $K^+ - 0,86 Mg^{++} + 3,61 = 0$

(1) et (2) permettent de calculer une relation entre K^+ et $PO_4H_2^-$:

$$(8) \quad K^+ - 4,82 PO_4H_2^- + 0,88 = 0$$

qui est assez peu différente de (4).

Les trois droites d'équation (1), (2) et (4) peuvent donc être considérées comme les projections d'une seule droite de l'espace. En négligeant les termes constants et en ramenant les coefficients à des nombres entiers, nous pouvons écrire :

$$\frac{NO_3^-}{16} = \frac{PO_4H_2^-}{1} = \frac{K^+}{5}$$

et

$$(9) \quad \frac{NO_3^-}{16} = \frac{PO_4H_2^-}{1} = \frac{K^+}{5}$$

Nous constatons au passage que la relation définie en 1964 entre NO_3^- et $PO_4H_2^-$ est vérifiée avec un dispositif expérimental sensiblement différent, entre autre par l'orientation des coupes.

Le même raisonnement nous amène à écrire : d'après (1), (3) et (5)

$$(10) \quad \frac{NO_3^-}{16} = \frac{PO_4H_2^-}{1} = \frac{Ca^{++}}{10}$$

La relation (6) donne :

$$(11) \quad \frac{K^+}{2} = \frac{Ca^{++}}{1}$$

et finalement nous pouvons écrire :

$$(12) \quad \frac{NO_3^-}{16} = \frac{PO_4H_2^-}{1} = \frac{K^+}{5} = \frac{Ca^{++}}{10}$$

La relation (7), qui peut s'écrire :

$$\frac{K^+}{1} = \frac{Mg^{++}}{1}$$

et le résultat de 1964 :

$$\frac{NO_3^-}{10} = \frac{SO_4^{--}}{1} = \frac{PO_4H_2^-}{1}$$

nous amènent à définir la composition optimale de la solution nutritive du cotonnier, cultivé sans sol dans les conditions que nous avons précisées, par la relation :

$$\frac{NO_3^-}{16} = \frac{SO_4^{--}}{1} = \frac{PO_4H_2^-}{1} = \frac{K^+}{5} = \frac{Ca^{++}}{10} = \frac{Mg^{++}}{5}$$

(graph. 12-13-14-15)

Nous constatons que l'équilibre cationique ainsi défini diffère assez peu de celui de la solution de Hoagland qui est :

$$\frac{K^+}{6} = \frac{Ca^{++}}{10} = \frac{Mg^{++}}{4}$$

d) Etude de l'action de la dose (concentration)

Cette étude est conduite en tenant compte du résultat de 1964 pour l'équilibre anionique. L'équilibre cationique est celui de la solution de Hoagland. Celui-ci est assez peu différent de l'optimum que nous venons de définir. Cette concordance assez bonne nous a permis de gagner un an pour la définition complète de notre milieu.

Les doses mises en comparaison avaient les compositions suivantes (en méq) pour trois litres de solution).

Doses	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻⁻	PO ₄ H ₂ ⁻	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
1	12	0,75	0,75	3,75	6,25	2,5
2	24	1,5	1,5	7,5	12,5	5
3	48	3,0	3,0	15	25,0	10
4	72	4,5	4,5	22,5	37,5	15
5	96	6,0	6,0	30	50,0	20

Cet essai, réalisé en 1965, a donné les résultats :

Doses	Production moyenne (g/plant observé)	Production ajustée
1	35,6	34,5
2	48,4	53,2
3	103,9	102,1
4	137,6	141,8
5	142,2	140,4
p.p. d.s. = 0,05	31,2	

Ces résultats peuvent être ajustés à une courbe sigmoïde dont l'équation est un polynôme du troisième degré :

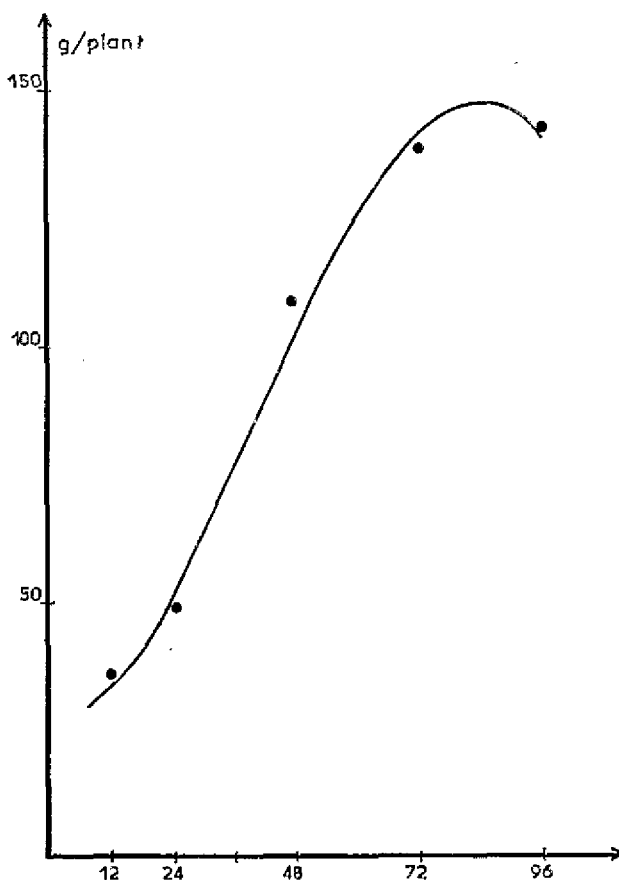
$$Y = 24,73 + 4,06 X + 6,34 X^2 - 0,63 X^3$$

où

Y = production en gramme de coton-graine par plant

X = doses en $\frac{\text{méq}}{12}$ pour 3 litres de solution

Cet ajustement est très hautement significatif. Le coefficient de corrélation multiple est de 0,96.

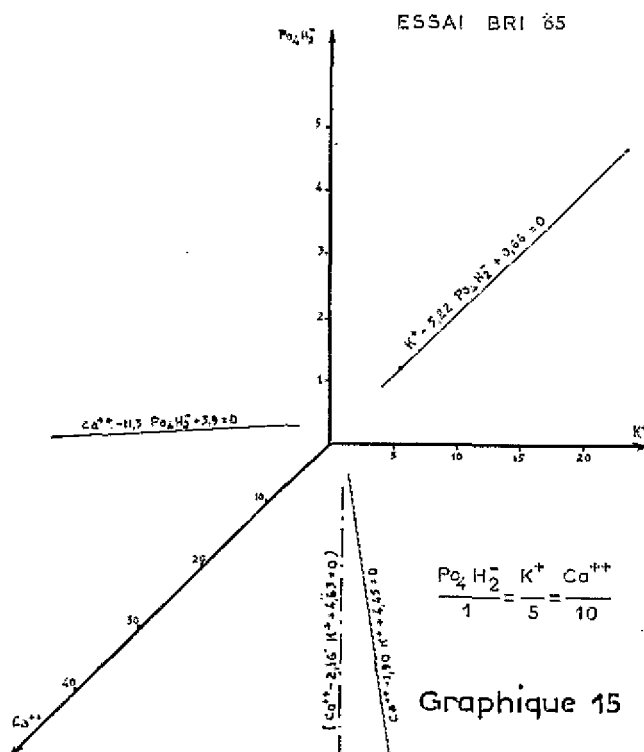
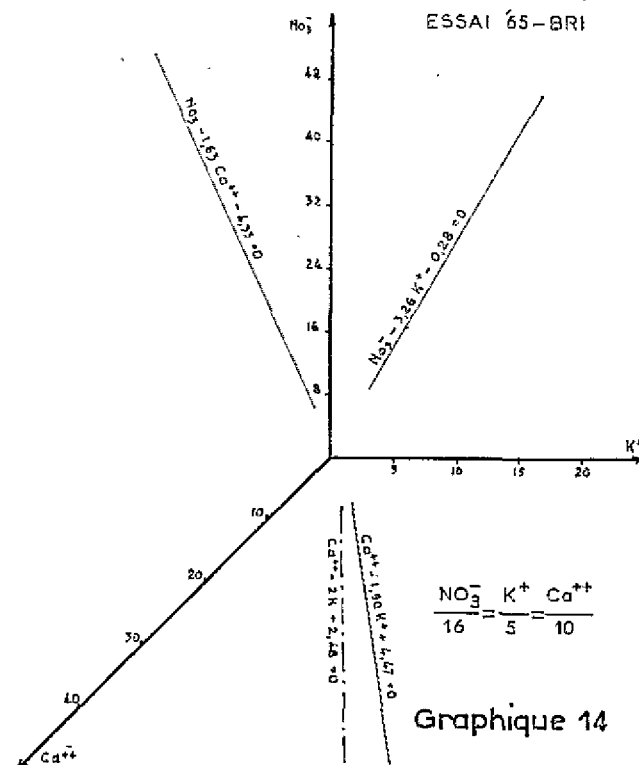
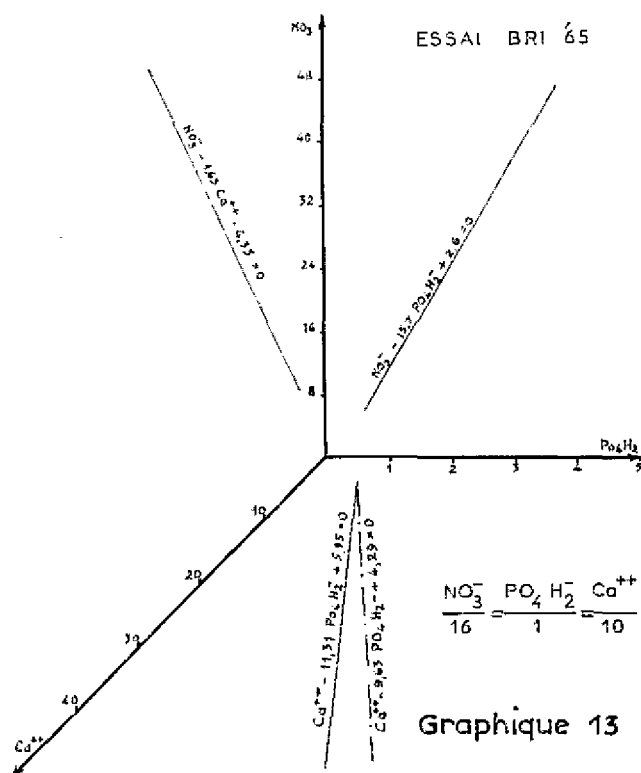


La courbe de production montre que le palier est atteint pour la dose 4, dose que nous retiendrons comme optimum.

Elle peut être obtenue de la façon suivante :

$$\begin{aligned} 4\,425 \text{ mg de } (NO_3)_2Ca, 4 H_2O &= 18,7 \text{ mM} \\ 1\,767 \text{ mg de } NO_3K &= 17,5 \text{ mM} \\ 1\,344 \text{ mg de } (NO_3)_2Mg, 6 H_2O &= 5,2 \text{ mM} \\ 409 \text{ mg de } NO_3H &= 6,5 \text{ mM} \\ 612 \text{ mg de } PO_4H_2K &= 4,5 \text{ mM} \\ 553 \text{ mg de } SO_4Mg, 7 H_2O &= 2,2 \text{ mM} \end{aligned}$$

toujours pour 3 litres de solution, dans les conditions de l'expérimentation.



III. — ÉTUDES PARTICULIÈRES

a) Le soufre, facteur limitant par excès

Des baisses de rendement ont pu être associées dans certains cas à des teneurs en soufre élevées observées dans les feuilles de cotonnier.

En 1964, un essai au champ réalisé à KOGONI, avait donné les résultats :

Traite- ment	(1) N kg/ha	(2) P ₂ O ₅ kg/ha	(3) S kg/ha	Production cot.-graine kg/ha	S % dans feuille
Témoin	0	0	0	1 733	0,58
S	0	0	108	1 587	0,79
NP	135	103,5	0	3 703	0,44
NPS	135	103,5	108	3 366	0,64

(1) : Urée - (2) : Triple super - (3) : Sulfate de chaux.

L'action dépressive du soufre constatée n'est pas significative du fait de la grande variabilité de cet essai.

Cet effet dépressif, s'il est confirmé, peut s'expliquer par une action sur le sol (acidification) ou bien par une action physiologique sur la plante. Il nous a semblé intéressant d'étudier ce dernier point en culture sans sol.

Le dispositif expérimental adopté est simple. La teneur en soufre de la solution a été augmentée en partant de la composition optimum, ceci pour deux niveaux.

La composition des solutions était la suivante (en méq/3 l).

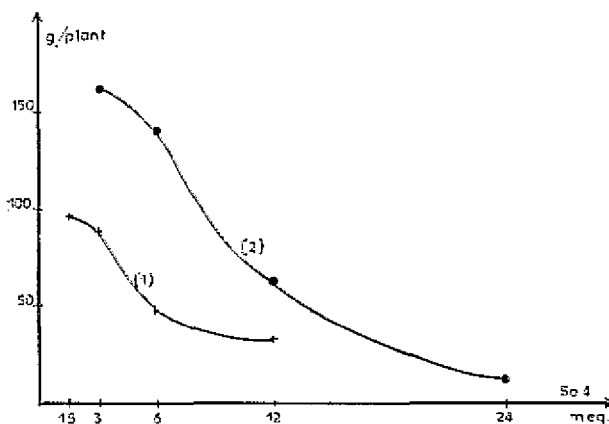
N° traite- ments	SO ₄ ⁺⁺	NO ₃ ⁻	PO ₄ H ₂ ⁻	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺
3	1,5	24	1,5	7,5	12,5	5
104	3					
105	6					
106	12					
8	3	48	3	15	25	10
107	6					
108	12					
109	24					

Nous avons obtenu les résultats suivants (en grammes de coton-graine par plant).

Niveau 1		Niveau 2	
SO ₄ ⁺⁺	g/plant	SO ₄ ⁺⁺	g/plant
1,5	95,5	3	161,5
3	89,3	6	140,8
6	48	12	61,5
12	32	24	11,2

Ces résultats montrent que l'alimentation en soufre ne saurait dépasser certaines limites sans entraîner une chute de production qui est ici spectaculaire au niveau 2. Le fait de multiplier la teneur en soufre par 4 diminue la production de 50 % au niveau 1 et de plus de 60 % au niveau 2.

En dehors de l'action acidifiante de l'ion SO₄⁺⁺ sur le sol qui n'est pas à négliger à long terme, il semble donc que l'on doive examiner avec soin les quantités de soufre apportées par les formules d'engrais dont on n'aurait étudié la composition qu'en fonction des trois éléments classiques NPK.



b) Les déficiences minérales N, S, P, K, Mg, B, Fe

Une experimentation annexe nous a conduit à provoquer l'apparition des symptômes de déficience minérale sur cotonnier. Le but de cet essai était principalement d'étudier les conditions d'utilisation d'un substrat parfaitement inerte chimiquement : le polystyrène expansé. Les symptômes de déficience minérale ont fait l'objet d'études très nombreuses et il n'était pas dans nos intentions de les reprendre. Néanmoins, il nous a semblé intéressant de refaire ces expériences en profitant de cet essai pour avoir nos propres documents photographiques.

Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental était simple ; la solution de Hoagland, telle qu'elle a été définie dans notre essai préliminaire, a été utilisée comme solution de base. La carence absolue en chaque macro-élément a été provoquée à partir du troisième changement de solution, et dès le départ de la culture pour les oligo-éléments.

Le substrat était constitué par des glomérules de polystyrène que nous avons expansé nous-mêmes à l'étuve, en atmosphère humide à 105° C. Ce produit ayant une densité très faible, il a été maintenu dans le bac par une plaque en chlorure de polyvinyle percée d'un trou en son centre pour le passage de la tige de cotonnier.

Observations

Nous nous limiterons aux observations plus ou moins originales ou importantes que nous avons pu faire. Nous renvoyons à la littérature ("Hunger signs in crops" par exemple) pour les symptômes classiques.

• Carence en azote et en soufre.

Il a toujours été difficile de distinguer au champ ces deux déficiences. Le seul critère qui a été retenu, en dehors de l'analyse foliaire, est le fait que la déficience azotée apparaît d'abord sur les feuilles âgées de la base du plant alors que la déficience soufrée se manifeste en premier lieu sur les jeunes feuilles au sommet du cotonnier.

Dans nos conditions d'expérimentation, où une carence aiguë a été créée, une autre différence est apparue. Les nervures des feuilles de cotonnier carencées en azote se décolorent alors que celles carencées en soufre restent parfaitement vertes.

• Carence en phosphore.

Très tôt des symptômes rappelant des taches d'*Alternaria* sont apparus. Nous avons corrigé la carence phosphatée avec un bac et ces taches ont disparu alors qu'elles ont continué à se développer sur les cotonniers carencés. Il y a donc bien une liaison avec la carence en phosphore. Nous avons eu l'occasion de retrouver ces symptômes sur des cotonniers cultivés en culture sans sol "stricto sensu" à ADIOPODOUMÉ. La carence phosphatée était provoquée ici par une précipitation du phosphore sous forme de phosphate ferrique.

• Carence en potassium.

Les symptômes observés sont très classiques et correspondent parfaitement à ce que nous avons pu observer au cours de la campagne 1965 tant en Afrique Centrale que dans la zone littorale de l'Afrique de l'Ouest (Dahomey, par exemple).

• Carence en magnésium.

Les symptômes sont également très classiques. Ils ont pu être observés au champ au sud Togo. Nous en avons trouvé également à ADIOPODOUMÉ sur quelques cotonniers cultivés dans le jardin d'essais.

• Carence en bore.

Les symptômes se sont manifestés très rapidement par la nécrose de la grande majorité des méristèmes terminaux. Le jeune plant a pris un port buissonnant très caractéristique. Les feuilles sont devenues cassantes avec des nervures très saillantes et blanchâtres.

La correction de cette carence a eu un effet immédiat. La végétation a eu un nouveau départ explosif. Nous avons pu faire une observation curieuse : les feuilles se fanaient au milieu de la journée malgré une alimentation en eau satisfaisante laissant supposer que le système racinaire était devenu insuffisant pour assurer l'alimentation en eau du système aérien, du fait du développement extrêmement rapide de celui-ci.

• Carence en Fer.

Les symptômes sont apparus très tardivement : chlorose par taches, accompagnée de nécroses le long des nervures, gagnant progressivement toute la feuille.

Nous n'insisterons pas sur cet aspect de la nutrition minérale du cotonnier qui offre peu d'applications pratiques. Lorsque ces symptômes apparaissent sur une culture annuelle comme le cotonnier, la situation est déjà très grave. Nous avons à notre disposition d'autres moyens, les analyses foliaires par exemple, pour la prévenir. Notons que s'il est relativement facile d'étudier ces symptômes dans les conditions où nous les avons créées, le problème devient beaucoup plus difficile au champ où nous pouvons nous trouver en présence de déficience simple mais aussi de déséquilibre, d'un ensemble de déficiences, etc., avec tous les symptômes possibles et mal connus.

IV. — CONCLUSION

Notre méthode expérimentale se révèle précise et fidèle malgré les conditions de travail souvent difficiles et les faibles moyens dont nous disposons à BAMBARI.

Nous avons pu définir un milieu nutritif optimum dont la composition se révèle très proche de la solution de Hoagland, qui nous avait déjà donné le meilleur résultat dans un essai préliminaire. La teneur élevée en soufre peut être diminuée et la proportion à respecter entre les cations est quelque peu modifiée. Cette composition doit satisfaire à la relation :

$$\frac{\text{NO}_3^-}{16} = \frac{\text{SO}_4^{--}}{1} = \frac{\text{PO}_4\text{H}_2^-}{1} = \frac{\text{K}^+}{5} = \frac{\text{Ca}^{++}}{10} = \frac{\text{Mg}^{++}}{5}$$

(en méq)

La concentration optimum du milieu est obtenue

en donnant à NO_3^- la valeur 24 méq pour un litre de solution.

Ces résultats vont permettre de préciser les niveaux critiques en explorant la surface de réponse de part et d'autre de la ligne de crête définie par la relation ci-dessus.

Un essai préliminaire portant sur l'effet limitant du soufre par excès montre que dans certains cas nous devons déterminer également les niveaux au-delà desquels se manifeste cet effet dépressif.

Dans un essai annexe sur les carences minérales, nous avons recueilli des documents photographiques qui ont un intérêt un peu secondaire. Par contre, cet essai nous a permis de préciser les conditions d'utilisation de polystyrène expansé, substrat qui peut présenter un grand intérêt pour des études sur les oligo-éléments.

CONCLUSION

Our experimental method is found to be accurate and constant, despite of often difficult working conditions and of the poor means available for us at BAMBARI.

We were able to define an optimum nutritive medium whose composition is found to be very similar to Hoagland solution with which we had obtained the best result in a preliminary trial. The high sulphur content may be reduced and the proportion to be observed between cations is somewhat modified. This composition should comply with the relationship:

$$\frac{\text{NO}_3^-}{16} = \frac{\text{SO}_4^{--}}{1} = \frac{\text{PO}_4\text{H}_2^-}{1} = \frac{\text{K}^+}{5} = \frac{\text{Ca}^{++}}{10} = \frac{\text{Mg}^{++}}{5}$$

(en méq)

Medium optimum concentration is obtained by giving to NO_3^- the value of 24 méq for one litre of solution.

These results will permit to define the critical levels by exploring the response surface on either side of the crest line defined by the above relationship.

A preliminary trial applying to sulphur limiting effect by excess shows that in some cases we shall have also to determine the levels beyond which this depressive effect occurs.

In an annexed trial on mineral deficiencies we collected photographic data offering a somewhat secondary interest. On the other hand, this trial permitted to define the conditions of use of expanded polystyrene, a substrate that can be highly interesting for studies on micro-elements.

CONCLUSIÓN

Nuestro método experimental se revela preciso y fiel a pesar de las condiciones de trabajo a menudo difíciles y los escasos medios de que disponemos en BAMBARI.

Hemos podido definir un medio nutritivo óptimo cuya composición se aproxima mucho de la solución de Hoagland, que nos había dado un excelente resultado en un ensayo preliminar. La dosis elevada de azufre puede ser disminuida y se modifica ligeramente la proporción que se ha de respetar entre los cationes. Esta composición debe satisfacer a la relación:

$$\frac{\text{NO}_3^-}{16} = \frac{\text{SO}_4^{--}}{1} = \frac{\text{PO}_4\text{H}_2^-}{1} = \frac{\text{K}^+}{5} = \frac{\text{Ca}^{++}}{10} = \frac{\text{Mg}^{++}}{5}$$

(en méq)

La concentración óptima del medio se obtiene dando a NO_3^- el valor 24 méq por litro de solución.

Los resultados permitirán precisar los niveles críticos explorando la superficie de respuesta de un lado y otro de la línea de cresta definida por la relación precedente.

Un ensayo preliminar relativo al efecto de la limitación del azufre por exceso muestra que en ciertos casos deberemos determinar igualmente los niveles más allá de los cuales se manifiesta este efecto depresivo.

En un ensayo anexo sobre las carencias minerales, hemos obtenido documentos fotográficos de simple interés secundario. En cambio, este ensayo nos ha permitido precisar las condiciones de utilización del poliestireno expandido, substrato que puede presentar gran interés para los estudios sobre los oligo-elementos.